第 39 卷 第 6 期
2022 年 12 月
应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics
Vol. 39 No. 6
Dec. 2022

文章编号:1000-4939(2022)06-1178-07

梯度界面对 Cu/WC_P 功能梯度材料力学性能影响

俞海[1],刘云鹏[2]

(1. 北方民族大学土木工程学院,750021 银川;2. 北京科技大学材料科学与工程学院,100083 北京)

摘 要:为了研究梯度界面或层状梯度对 Cu/WC_P 功能梯度材料力学性能的影响,采用粉末冶金法制备了 WC 体积含量分别为 3%、6%、9%、12%、15% 的 Cu/WC_P 复合材料,利用数字图像相关方法结合拉伸实验研究了 WC 体积含量对 Cu/WC_P 复合材料拉伸性能的影响,并通过有限元方法模拟了 5 层 Cu/WC_P 功能梯度材料在沿层向方向拉伸作用下的变形特性及力学行为。拉伸实验结果表明:WC 颗粒的掺入明显提高了 Cu/WC_P 复合材料的刚度和强度,但随 WC 颗粒含量的增加,Cu/WC_P 复合材料的塑性变形能力明显下降,当应力为 214 MPa 时,3% WC 体积分数 Cu/WC_P 复合材料的应变是 15% 体积分数 Cu/WC_P 复合材料的 25.45 倍。有限元分析结果表明:沿层向方向拉伸作用下,5 层 Cu/WC_P 功能梯度材料各层内的塑性变形及应变率均呈现出非均匀性,塑性变形及应变率均沿 WC 含量递减的方向逐渐增大。另外,在梯度界面附近沿 WC 含量递减方向,梯度界面的存在对塑性应变率的增加有明显的抑制作用。

关键词:Cu/WC_P 功能梯度材料;梯度界面;数字图像相关方法;力学行为

中图分类号:TB33 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.019

The effect of gradient interface on the mechanical properties of Cu/WC_P functionally graded materials

YU Hai [1], LIU Yunpeng[2]

(1. School of Civil Engineering, North Minzu University, 750021 Yinchuan, China;
2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, 100083 Beijing, China)

Abstract: In order to study the effect of gradient interface or layered gradient on the mechanical properties of Cu/WC_P functionally graded materials, Cu/WC_P composites with WC volume contents of 3%, 6%, 9%, 12%, and 15% were prepared by powder metallurgy. The effect of WC volume content on the tensile properties of Cu/WC_P composites was analyzed by using digital image correlation method combined with tensile experiments, and the deformation characteristics and mechanical behavior of the five-layer Cu/WC_P functional gradient material under the tensile action along the layer direction were simulated by finite element method. The tensile experimental results showed that the incorporation of WC particles significantly im-

收稿日期:2021-11-07 **修回日期**:2022-02-09
基金项目:宁夏自然科学基金资助项目(No. 2020AAC03192);北方民族大学校级一般项目(No. 2020XYZTM02)
通信作者:俞海。E-mail:yuhai1212@126.com
引用格式:俞海,刘云鹏. 梯度界面对 Cu/WC_P 功能梯度材料力学性能影响[J]. 应用力学学报,2022,39(6):1178-1184.
YU Hai, LIU Yunpeng. The effect of gradient interface on the mechanical properties of Cu/WC_P functionally graded materials[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(6):1178-1184.

proved the stiffness and strength of Cu/WC_P composites, but the plastic deformation ability of Cu/WC_P composites decreased significantly with the increase of WC particle content, and the strain of 3% WC volume fraction Cu/WC_P composites was 25.45 times that of 15% WC volume fraction Cu/WC_P composites when the stress was 214 MPa. The results of finite element analysis showed that the plastic deformation and strain rate within each layer of the five-layer Cu/WC_P functional gradient material presented non-uniformity under the tensile action along the layer direction, and the plastic deformation and strain rate increased gradually in the direction of WC content decrease. In addition, the existence of the gradient interface near the gradient interface along the direction of WC content decrease had a significant inhibitory effect on the increase of plastic strain rate. This study has certain reference for the design of metal-based functional gradient functional materials and their applications.

Key words: Cu/WC_P functionally gradient material; gradient interface; digital image correlation method; mechanical behavior

功能梯度材料[1-4]是指其成分和性能随着位置的变化而变化的材料。自 Kawasaki[5]在高温金属/陶瓷航空部件中引入功能梯度材料以来，功能梯度材料便获得了广泛的商业应用，包括航空航天、核能、耐磨涂层、生物医学设备、纳米技术、地质结构及高温结构等各个领域[6-7]。功能梯度材料一般由两种或两种以上的单一材料组成，可根据特定规律通过空间连续变化获得。根据其成分分布情况，功能梯度材料可分为连续梯度材料和层状梯度材料。功能梯度材料由于其组分随位置变化而变化，使得功能梯度材料一般具有各向异性的力学性能，因此功能梯度材料的力学性能及力学行为引起了大量学者的关注和研究。

Erdemir 等[6]研究了粉末冶金法制备的 Al2024/SiC 功能梯度复合材料的微观结构与力学性能之间的关系，结果表明，显微硬度的增加和金属间化合物的形成在改善复合材料机械性能方面起着主要作用。Tilbrook 等[8]研究了多层氧化铝-环氧树脂复合材料中初始裂纹方向及位置对裂纹扩展路径的影响，结果表明多层材料结构表现出各向异性的弹性和抗破坏能力会强烈影响裂纹的扩展，从而影响整体结构的完整性。Uzun 等[9]研究了 Al2124/SiC/10p 功能梯度材料的疲劳裂纹扩展行为，发现与传统的均匀复合材料相比，功能梯度材料具有良好的抗疲劳裂纹扩展性能。Xu 等[10]研究了 SiC 颗粒增强铝基梯度复合材料的疲劳裂纹扩展行为，揭示了裂纹扩展速率由于界面处的偏转和分叉而降低。另外，由于在实验方面制造适合测试的大尺寸断裂试样的难度较大，成本较高，使得多数研究者开展了对功能梯度材料的数值计算分析研究。Marur[11]通过有限元和实验研究了对称三点弯曲 FGM 梁试样的断裂性能，结果表明当裂纹位于 FGM 基底和均匀基底的界面时，FGM 试样的断裂载荷明显高于双材料试样，并且与均匀试样的断裂载荷大致相同。Martinez-paneda 等[12]利用有限元软件 ABAQUS 研究了功能梯度材料断裂问题数值模拟的现有能力和局限性，并强调了对表征材料性能变化的实验数据进行数值拟合的必要性，同时提出了一种新的方法来提高结果的准确性。Anlas 等[13]研究了有限单元法在功能梯度材料裂纹板和非裂纹板中的应用，通过给每个单元分配不同的均匀弹性特性来离散材料特性变化，将有限元结果与现有的分析结果进行比较，并讨论了网格尺寸对结果的影响。Berezovski 等[14]利用复合波传播算法对应力波在功能梯度材料中的传播进行了数值研究。

相较于连续梯度材料复杂的制备工艺，金属基功能梯度复合材料由于其具有相对简单的制备工艺[15-16]，将是层状梯度材料[17]的发展方向之一。金属基功能梯度复合材料在部件中具有特定的位置性能，除了发挥其特定性能外，在结构或部件中，往往要求其承受高应力、高载荷。对于层状梯度材料，材料组分的变化并非均匀过渡，而是逐层渐进式的过度，这必然导致不同组分之间界面的存在。层间界面对其力学性能起着重要的作用，在高载荷情况下甚至对结构或部件的损伤及破坏有着重要的影响。金属基功能梯度复合材料由不同体积分数的颗粒增强金属基复合材料按设计进行组分，通过梯度堆积热压烧结而成。由于颗粒增强体的掺入，使得具有不同体积分数的复合材料表现出不同的塑性及韧性，通过梯度堆积热压烧结成型后，梯度界面的存在

必然引起整体力学性能的较大改变。因此,研究探索梯度界面对金属基功能梯度复合材料的变形与断裂机制,对此类材料在高负载情况下的应用具有重要意义。

为了研究梯度界面对金属基功能梯度材料力学性能的影响,本研究利用粉末冶金法制备了不同 WC 体积含量的 Cu/WC_P 复合材料,利用数字图像相关方法获取了该复合材料的应力-应变曲线,通过获取的应力应变数据作为基本力学参数,结合有限单元法研究了多层 Cu/WC_P 功能梯度材料沿层向方向拉伸作用下的变形及力学行为。最后分析了层状 Cu/WC_P 功能梯度材料在层向拉伸荷载作用下所具有的变形特性。

1 实 验

1.1 材料制备

本研究采用粉末冶金的方法制备 Cu/WC_P 复合材料,所选用的原材料为树枝状铜粉和不规则 WC 颗粒(所采用的 WC 颗粒的平均粒径为 3.75 μm)。用粉末真空热压烧结法分别制备了 WC 颗粒体积含量为 3%、6%、9%、12%、15% 的 5 种 Cu/WC_P 复合材料。具体烧结过程为:按预先设定的 WC 平均粒径和体积分数,将 WC 和铜粉分别放入球磨机中进行球磨混粉;将混合好的粉末分别装入石墨热压模具中,然后将模具放置到真空热压烧结炉内。为了防止烧结体氧化,在加热烧结之前,要对炉腔抽真空,使炉腔内大气压在 10 Pa 以下,然后以 15 ℃/min 的速度使其升温到 200 ℃,压力保持在 1 MPa;再以较低的升温速度(10 ℃/min)使其升至烧结温度 950 ℃,匀速加压至 30 MPa,保温保压 2 h,最后随炉冷却至室温。图 1 ~2 分别为铜碳化钨混合粉末形貌图及不同 WC 含量下 Cu/WC_P 复合材料试样表面光学图像。

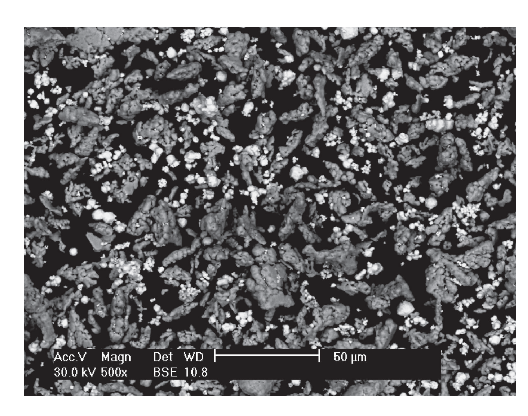


图 1 铜碳化钨混合粉末(3.75 μm WC)形貌图

Fig. 1 Mixed powder morphology of copper tungsten carbide(3.75 μm WC)

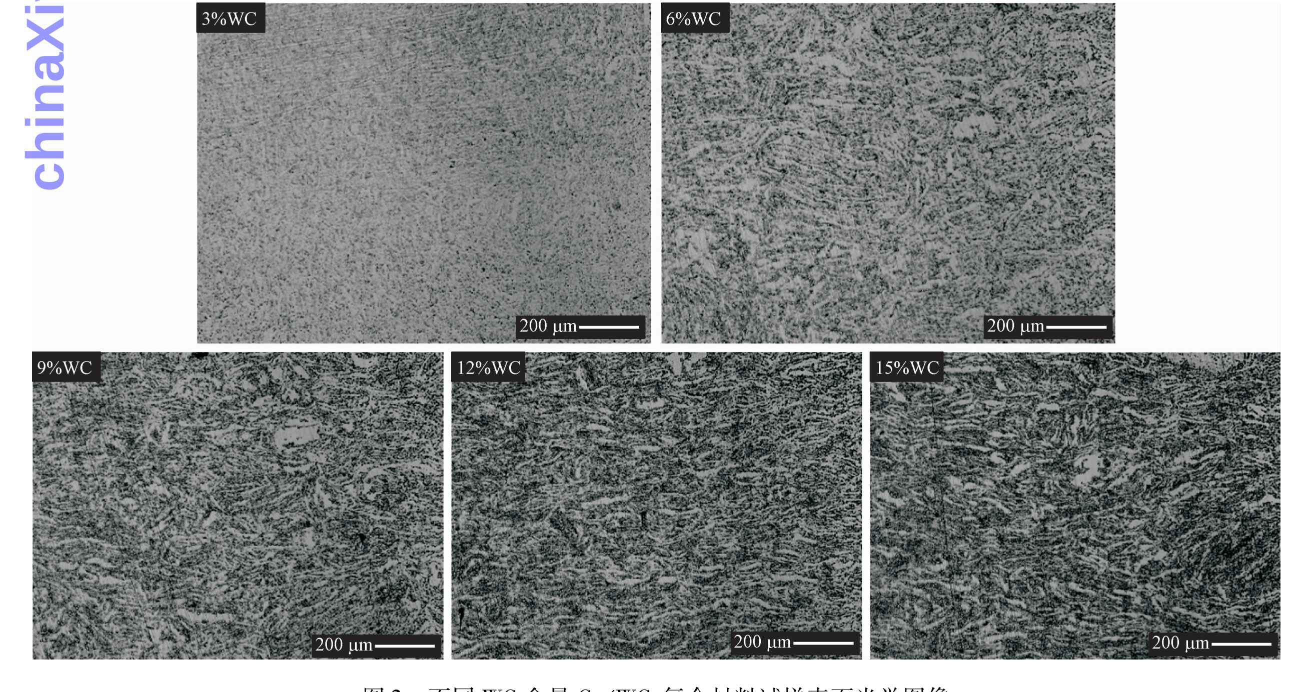
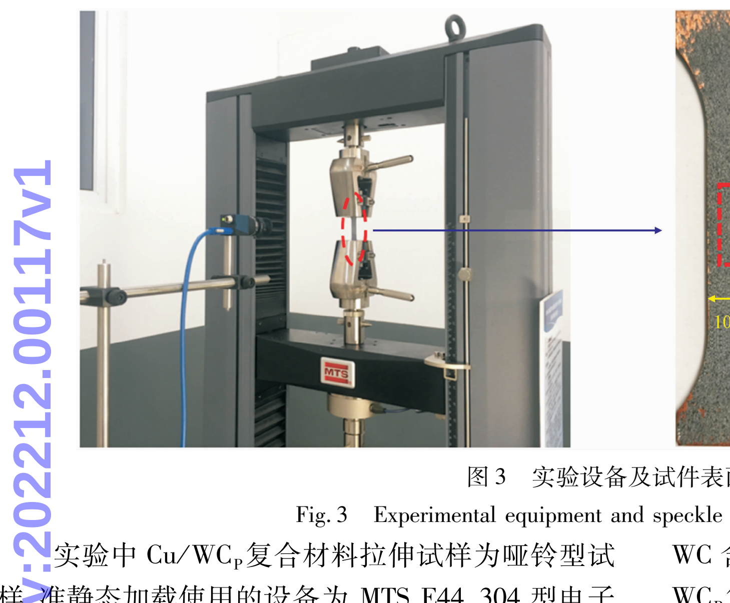


图 2 不同 WC 含量 Cu/WC_P 复合材料试样表面光学图像

Fig. 2 Optical images of Cu/WC_P composites with different WC contents

1.2 单层拉伸实验

为了准确获取不同 WC 含量下 Cu/WC_p复合材料拉伸荷载下的应力-应变曲线，本研究利用数字图像相关方法[18-19]来计算不同载荷下试件对应的应变。利用数字图像相关方法对试件应变进行计算需要对试件表面进行制斑处理。试件表面的散斑质量对数字图像相关方法的测量精度有很大的影响，不同的散斑制作方法得到的散斑点尺寸和均匀性有很大差异。根据相关文献[20-21]，散斑颗粒理想大小为 2～5 pixels。一般人工制备散斑大都是通过在试件表面交替喷洒黑白漆制作而成。本研究在利用真空热压烧结法制备 Cu/WC_p复合材料时，由于受模具尺寸的限制，最终成型的 Cu/WC_p复合材料毛坯，再经进一步加工制成可以测试的试样尺寸相对较小，因此试样表面散斑的制备采用白色喷漆配合碳粉颗粒的方法。先在试样表面覆盖一层白色薄漆，然后在白色薄漆上喷洒碳粉，待白色喷漆固化成型即可。这样制备的散斑颗粒细小，且分布均匀，适合小试件散斑的制备，图 3 为实验加载设备及试件表面散斑图。



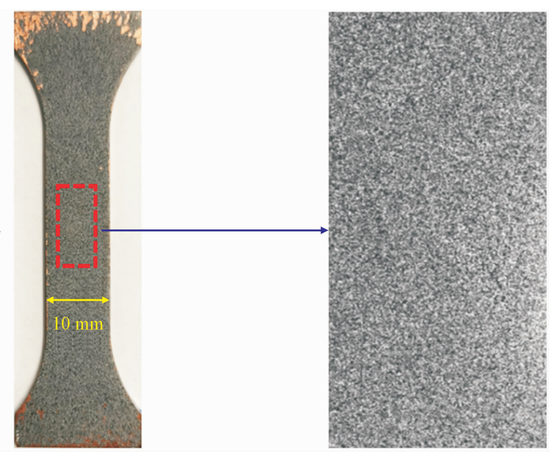


图 3 实验设备及试件表面散斑图

Fig. 3 Experimental equipment and speckle pattern of specimen surface

实验中 Cu/WC_p复合材料拉伸试样为哑铃型试样，准静态加载使用的设备为 MTS E44.304 型电子万能材料试验系统。实验采用位移加载控制方式，加载速率为 0.5 mm/min，图像采集设备分辨率为 2 592 × 1 944 pixels。整个加载过程中，利用图像采集设备逐级记录不同荷载下试件表面的散斑图，以计算对应荷载下试件的应变。

1.3 5 层模拟拉伸实验

由于受模具尺寸限制以及制造适合测试的大尺寸试样的难度和成本，本研究基于有限单元法并结合单层拉伸实验得到的不同 WC 含量下 Cu/WC_p复合材料应力-应变数据，开展了 5 层 Cu/WC_p FGMs 沿层向方向拉伸作用下的仿真拉伸实验研究。模拟实验采用有限元分析软件 ANSYS 19.2 来实现，实验中拉伸试样采用哑铃型试样，建立的 5 层 Cu/WC_p FGMs 三维有限元模型如图 4 所示。图 4 拉伸试样中平行段的长度 L = 10 mm（共 5 层，每层 2 mm），宽 W = 2.5 mm，试样厚度 H = 1 mm，不同颜色代表所在位置不同的材料属性，从下往上依次为 WC 含量分别为 3%、6%、9%、12%、15% 的 5 种 Cu/WC_p复合材料，哑铃型端部部分采用与临近层相同的材料属性。

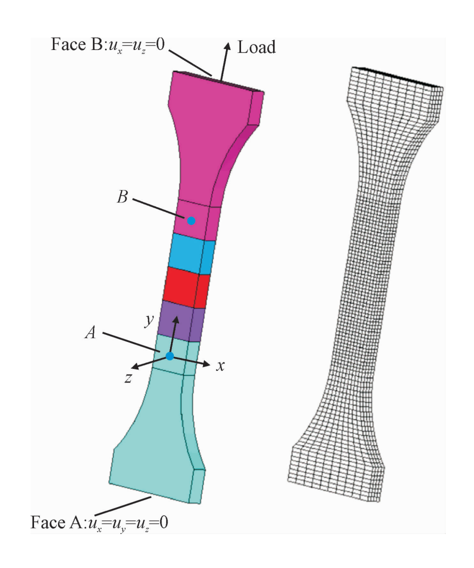


图 4 五层 Cu/WC_p FGMs 几何模型及有限元网格模型

Fig. 4 Five-layer Cu/WC_p FGMs geometric model and finite element mesh model

对于 Cu/WC_p复合材料，由于 WC 颗粒的掺入使得 Cu/WC_p复合材料的强度及塑性性能有明显的改变，因此为了研究梯度界面或层状梯度对 5 层 Cu/WC_p FGMs 塑性变形的影响，采用具有中间节点的三维 20 节点 Solid186 单元，该单元支持塑性大变形大应变能力。为了与本研究 1.2 节单层拉伸实验加载速率保持一直，仿真实验中加载速率同样采用 0.5 mm/min。另外，对于塑性变形问题，强化准则对模拟结果有较大的影响，由于本研究 1.2 节实验可以获取不同 WC 含量下 Cu/WC_p复合材料的应力应变数据，因此本模拟实验采用多线性随动强化准则。

2 结果与分析

2.1 单层拉伸结果分析

表 1 为不同体积分数下 Cu/WC_p复合材料的力学性能。从表 1 可以看出，Cu/WC_p复合材料的弹性模量及抗拉强度均随 WC 增强颗粒体积分数的增加而提高，泊松比随 WC 增强颗粒体积分数的增加而逐渐降低。15% WC 体积分数下 Cu/WC_p复合材料的弹性模量相对于 3% WC 体积分数下 Cu/WC_p复合材料的弹性模量提高了 19.8%，而抗拉强度提高了 40%，因此 WC 颗粒的掺入使得 Cu/WC_p复合材料的强度提升明显要强于刚度提升。根据直接强化和间接强化理论[22]，直接强化理论基于一种修正的剪切滞后模型将整体的增强效应归因于增强体的承载特性；而间接强化理论将强化效应主要归因于基体的位错密度呈现数量级的增加，从而导致基体强度的增加。随着颗粒含量的增加，使得其对铜基体的直接强化作用增加，WC 颗粒承受了由铜基体传递的应力，降低了铜基体所承受的应力。图 5 给出了不同体积分数下 Cu/WC_p复合材料的应力-应变曲线，由于实验采用数字图像相关方法计算试件在不同荷载下的应变，所以通过 CCD 记录的有限的数字图像获取的应力-应变曲线为离散的散点图。从图可以看出，不同体积分数下的 Cu/WC_p复合材料表现出明显不同的塑性性能，图中应力最大值为 214 MPa时，3%、6%、9%、12%、15% WC 体积分数下 Cu/WC_p复合材料的应变分别为 0.066 2、0.031 2、0.005 3、0.002 9、0.002 6。由于 WC 颗粒含量的增加，使得 WC 颗粒对铜基体的间接强化作用有所增加，较多的 WC 颗粒细化了铜基体的晶粒，并且使得基体的局部位错密度增大，金属基体的滑移变得困难，使铜基体得到了强化，从而导致了材料塑性变形能力的大幅下降。

表 1 不同体积分数下 Cu/WC_p复合材料的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of Cu/WC_p composites with different volume fractions

WC 含量/%	泊松比	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa
3	0.360	116	219
6	0.345	121	242
9	0.335	127	264
12	0.327	133	289
15	0.320	139	307

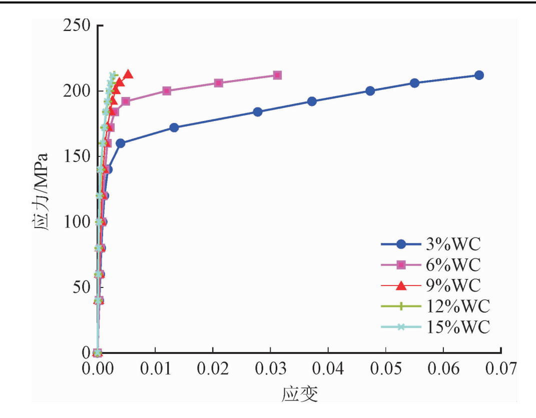


图 5 不同 WC 体积分数下 Cu/WC_p复合材料的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of Cu/WC_p composites with different WC contents

2.2 5 层模拟拉伸结果分析

从 2.1 节的实验结果及分析可以看出，WC 增强颗粒的掺入使得 Cu/WC_p复合材料的强度及塑性变形能力产生了很大的改变。因此对于层状 Cu/WC_p FGMs 材料在结构或部件中，在承受高应力或高载荷时，由于 WC 含量低的 Cu/WC_p复合材料具有较低的强度及较大的塑性变形，使得该部分材料成为了结构或部件的薄弱环节，最终导致结构或部件的失效或破坏。另外对于层状 Cu/WC_p FGMs，层状梯度或梯度界面的存在，必然会影响整体的力学性能，为了研究层状 Cu/WC_p FGMs 材料的变形特性，利用有限元方法模拟了 5 层 Cu/WC_p FGMs 的层向拉伸试验。图 6 给出了 6 个不同拉伸应力状态下试样平行段轴线上 A、B 两点之间对于 y 坐标的应变曲线。从图 6 可以看出，对于 6 个不同的拉伸应力状态，虽然各层材料均进入了塑性变形阶段，但由于

WC 含量高的 Cu/WC_p 复合材料具有较高的抗拉强度及较低的塑性变形能力，使得整个试件的塑性变形主要产生在 WC 含量为 3%、6% 及 6% ~9% 界面附近区域；受层状梯度或梯度界面的影响，沿层向方向各层内的变形并非均匀，而是沿 WC 含量递减的方向逐渐增大。从整个应变曲线来看曲线相对光滑，应变曲线在梯度界面及附近区域并没有出现明显波动情况。图 7 给出了图 6 各曲线对应的沿层向方向的应变率曲线，该曲线反映了沿层向方向塑性应变的变化情况。可以看出，沿层向 WC 含量递减方向，各不同拉伸应力下，塑性应变率整体呈递增规律。由于拉伸试样为哑铃型试样，在试样端部受试样尺寸效应的影响，导致 WC 含量为 3% ~6% 界面附近应变率明显降低。从图 7 结果来看，在各个界面附近，梯度界面的存在对塑性应变率的增加有明显的抑制作用（沿 WC 含量递减方向）。另外，结合图 6 及图 7，在 WC 含量为 3% 及 3% ~6% 界面附近同时具有较高的塑性应变及塑性应变率，使得该区域成为整个试件的薄弱区域，在 3% ~6% 界面附近，应变率极值点的位置与应力有一定关系，随着应力的增大应变率极值点从 WC 含量为 3% 一侧逐渐向 3% ~6% 界面靠近，在承受高应力或高载荷时，这对该附近区域材料的损伤及破坏具有较大的影响。

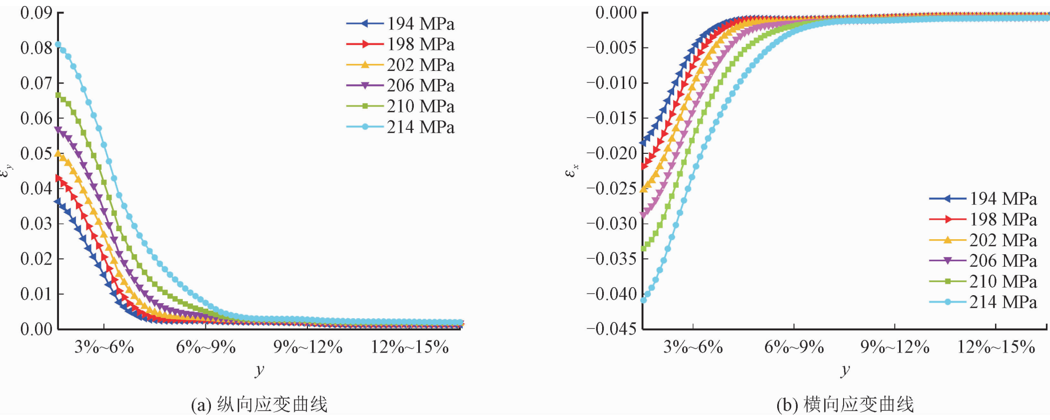


图 6　试件轴线上 A、B 两点之间对于 y 坐标的应变曲线

Fig. 6　The strain curve for the y-coordinate between A and B on the axis of the specimen

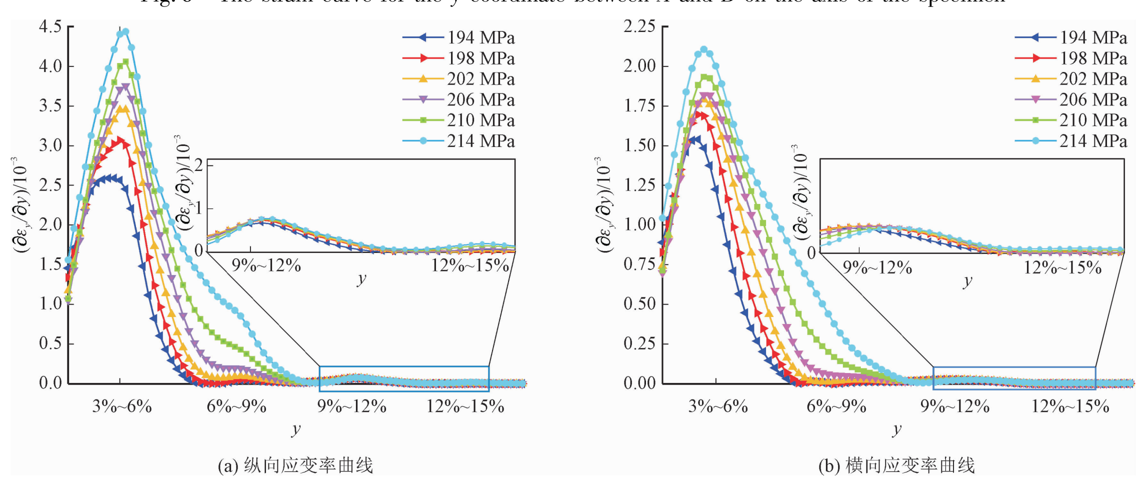


图 7　试件轴线上 A、B 两点之间对于 y 坐标的应变率曲线

Fig. 7　The strain rate for the y-coordinate between A and B on the axis of the specimen

3　结　论

1）粉末冶金制备的 Cu/WC_p 复合材料，由于 WC 增强颗粒的掺入，使得 Cu/WC_p 复合材料的弹性模量及抗拉强度均得到提高，尤其抗拉强度提高更为明显，15% WC 体积分数下 Cu/WC_p 复合材料的弹性模量相对于 3% WC 体积分数下 Cu/WC_p 复合材料的弹性模量提高了 19.8%，而抗拉强度提高了 40%。

2）从塑性变形能力来看，WC 增强颗粒的掺入使得 Cu/WC_p 复合材料的刚度和强度有明显的提

升，但其塑性变形能力却有着明显的大幅下降，单层拉伸实验中，当应力最大值为 214 MPa 时，3% WC 体积分数下 Cu/WC_P复合材料的应变分别是 6%、9%、12%、15%体积分数下 Cu/WC_P复合材料的 2.12 倍、10.51 倍、22.83 倍、25.45 倍。

3）通过有限元方法分析 5 层 Cu/WC_P FGMs 沿层向方向拉伸结果显示，沿层向方向各层内的塑性变形呈现出非均匀性，沿 WC 含量递减的方向逐渐增大，应变曲线在梯度界面及附近区域并没有出现波动情况，但由于梯度界面的存在，使得应变率在梯度界面及附近区域呈现的递增规律受到不同程度的扰动，从整体结果来看，梯度界面的存在使得在梯度界面附近沿 WC 含量递减方向对塑性应变率的增加有明显抑制作用。

参考文献：

[1] 刘超，刘文光. 金属陶瓷功能梯度板的模态频率分析[J]. 航空材料学报，2020，40(5)：88-95.
LIU Chao，LIU Wenguang. Modal frequency analysis of metallic-ceramic functionally graded plates[J]. Journal of aeronautical materials，2020，40(5)：88-95(in Chinese).

[2] 唐思文，刘德顺，李鹏南，等. TiCN 基梯度功能金属陶瓷的制备及其切削性能[J]. 功能材料，2014，45(13)：13126-13130.
TANG Siwen，LIU Deshun，LI Pengnan，et al. Preparation and cutting performance of TiCN-based functionally gradient cermets[J]. Journal of functional materials，2014，45(13)：13126-13130 (in Chinese).

[3] 胡国栋，张慧华，谭育新. 功能梯度材料稳态热传导问题的数值流形方法研究[J]. 应用力学学报，2017，34(2)：311-317.
HU Guodong，ZHANG Huihua，TAN Yuxin. Numerical manifold study of steady heat conduction problems in functionally graded materials[J]. Chinese journal of applied mechanics，2017，34(2)：311-317(in Chinese).

[4] 庞有卿，王爱文，郝育新，等. 功能梯度石墨烯增强复合材料板的自由振动[J]. 应用力学学报，2020，37(2)：558-565.
PANG Youqing，WANG Aiwen，HAO Yuxin，et al. Free vibration of functionally graded graphene-reinforced composite plates[J]. Chinese journal of applied mechanics，2020，37(2)：558-565(in Chinese).

[5] KAWASAKI A，WATANABE R. Finite element analysis of thermal stress of the metal/ceramic multi-layer composites with compositional gradients[J]. Journal of the Japan Institute of Metals，1987，51(6)：525-529.

[6] ERDEMIR F，CANAKCI A，VAROL T. Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded Al2024/SiC composites prepared by powder metallurgy techniques[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2015，25(11)：3569-3577.

[7] HIRSHIKESH S N，ANNABATTULA R K，MARTÍNEZ-PAÑEDA E. Phase field modelling of crack propagation in functionally graded materials[J]. Composites part B：Engineering，2019，169：239-248.

[8] ROZENBURG K，TILBROOK M T，STEFFLER E D，et al. Crack propagation paths in layered graded composites[J]. Composites part B：Engineering，2006，37(6)：490-498.

[9] LINDLEY T C，UZUN H，MCSHANE H B，et al. Fatigue crack growth behavior of 2124/SiC/10p functionally graded materials[J]. Metallurgical and materials transactions，2010，32(7)：1831-1939.

[10] ZHU S J，XU F M，ZHAO J，et al. Fatigue crack growth in SiC particulates reinforced Al matrix graded composite[J]. Materials science and engineering：A，2003，360(1/2)：191-196.

[11] MARUR P R，TIPPUR H V. Numerical analysis of crack-tip fields in functionally graded materials with a crack normal to the elastic gradient[J]. International journal of solids and structures，2000，37(38)：5353-5370.

[12] MARTINEZ-PANEDA E，GALLEGO R. Numerical analysis of quasi-static fracture in functionally graded materials[J]. International journal of mechanics and materials in design，2015，11：405-424.

[13] ANLAS G，SANTARE M H，LAMBROS J. Numerical calculation of stress intensity factors in functionally graded materials[J]. International journal of fracture，2000，104(2)：131-143.

[14] BEREZOVSKI A，ENGELBRECHT J，MAUGIN G A. Stress wave propagation in functionally graded materials[C]//Proceedings of 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. Warsaw，Poland：ICTAM，2004：2074-2075.

[15] RAJAN T P D，PAI B C. Developments in processing of functionally gradient metals and metal-ceramic composites：A review[J]. Acta metallurgica Sinica-English letters，2014，27：825-838.

[16] ZHAI Y B，CHANG M，LIU C M，et al. Characteristics of two Al based functionally gradient composites reinforced by primary Si particles and Si/in situ Mg_2Si particles in centrifugal casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2010，20(3)：361-370.

[17] ZHANG Y B，GUO R X，XIA H T，et al. Research on dynamic mechanical behavior and damage evolution mechanism of Cu/WCp laminated composites[J]. Materials research express，2021，8(1)：1-14.

[18] BRUCK H A，MCNEIL S R，SUTTON M A，et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. Experimental mechanics，1989，29(3)：261-267.

[19] PAN B，LU Z X，XIE H M. Mean intensity gradient：an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. Optics and lasers in engineering，2010，48(4)：469-477.

[20] YU H，GUO R X，XIA H T，et al. Application of the mean intensity of the second derivative in evaluating the speckle patterns in digital image correlation[J]. Optics and lasers in engineering，2014，60：32-37.

[21] ZHOU P，GOODSON K E. Sub-pixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)[J]. Optical engineering，2001，40(8)：1613-1620.

[22] RAMAKRISHNAN R. An analytical study on strengthening of particulate reinforced metal matrix composites[J]. Acta materialia，1996，44(1)：69-77.

（编辑　李坤璐）